International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)
Peer-Reviewed Journal
ISSN: 2349-6495(P) | 2456-1908(O)
Vol-9, Issue-11; Nov, 2022
Journal Home Page Available: https://ijaers.com/
Article DOI: https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.911.43



Performance analysis of different friction models in the numerical simulation of the isothermal forging process
Análise do desempenho de diferentes modelos de atrito na simulação numérica do processo de forjamento isotérmico

Thomas Gomes dos Santos[1], Diego Rafael Alba[2], André Rosiak[1], Lirio Schaeffer[1]

[1]Metal Forming Inovation Center CBCM – Federal University of Rio Grande do Sul UFRGS, Porto Alegre, Brasil
[2]Institute for Metal Forming Technology IFU – University of Stuttgart, Stuttgart, Germany

Received: 21 Oct 2022,

Received in revised form: 09 Nov 2022,

Accepted: 16 Nov 2022,

Available online: 22 Nov 2022

***Keywords*— Finite element analysis, Hot forging, IFUM, Friction models.**

***Palavras-chave*— Análise em elementos finitos, Forjamento a quente, IFUM, Modelos de atrito.**

Abstract— *Finite element analysis is a powerful tool for the design and optimization of mechanical forming processes. To achieve accurate results, a precise knowledge of the fundamental process parameters is required. In this context, this work analyzes the influence of several friction models in the numerical simulation of isothermal forging processes for a commercial aluminum alloy. Using the commercial software FORGE NxT 2.0, the friction models of, Tresca, Coulomb-Tresca and the Viscoplastico(Norton) friction model were considered and their results compared to forging experiments of an axisymmetric geometry. The objective is to evaluate which of these friction models is more appropriate to simulate the process. Hot forging experiments were performed and the most relevant numerical results for the process final geometry, consumed energy, forming strength and temperature were compared with the experimental results.*

Resumo— *A análise em elementos finitos é uma poderosa ferramenta para o projeto e otimização dos processos de conformação mecânica. Para atingir resultados com exatidão é necessário um conhecimento preciso dos parâmetros fundamentais de processo. Neste contexto, este trabalho analisa a influência de diversos modelos de atrito na simulação numérica dos processos de forjamento isotérmico para uma liga comercial de alumínio. Utilizando o software comercial FORGE NxT 2.0, os modelos de atrito de, Tresca, Coulomb-Tresca e o modelo de atrito Viscoplastico(Norton) foram considerados e seus resultados comparados à experimentos de forjamento de uma geometria axissimétrica. O objetivo é avaliar qual destes modelos de atrito se demonstra mais apropriado para simular o processo. Experimentos de forjamento a quente foram executados e os resultados numéricos mais relevantes para o processo geometria final, energia consumida, força de conformação e temperatura foram comparados com os resultados experimentais.*

I. INTRODUÇÃO

A simulação numérica em processos de conformação é uma ferramenta indispensável para redução de custos. Para que resultados precisos sejam atingidos, existe uma considerável dependência de que os parâmetros de entrada das simulações estejam em consonância com o comportamento real do processo.

Entretanto, devido a dificuldade em modelar corretamente tais parâmetros, engenheiros e pesquisadores utilizam simplificações as quais podem levar a resultados imprecisos. Dentre os parâmetros de entrada que possuem grande influencia podemos citar as condiçoes de atrito na interface entre geratriz e matriz. É evidente que a formulação considerada para este parâmetro influencia profundamente a correta predição da deformação do material, energia de conformação, desgaste, entre outros. Os efeitos das condições de contorno de atrito nas simulações dos processos de conformação de mecânica são o foco de diversos estudos, onde um grande número de modelos foi proposto e evoluíram ao longo do tempo.

Santos et al [1] estudou a deformação no processo de conformação de uma pá de turbina considerando uma condição interfacial sem atrito. Os resultados atingidos demonstraram-se bastante aquém da situação real de processo assim como encontrado por Alba et al [2]. O atrito em cálculos numéricos de processos de conformação tem sido tradicionalmente descrito usando o modelo de atrito de Coulomb-Amontons [3].

A principal desvantagem deste modelo é que a tensão de cisalhamento por atrito é superestimada assim que a resistência ao cisalhamento do material k é excedida. O modelo do fator de atrito [3] foi desenvolvido para remediar esse déficit. Entretanto, este modelo falha em descrever o estado da tensão de atrito para baixos valores de tensão. Desta forma, Orowan[4] propôs combinar ambos os modelos – Coulomb e Tresca – e utilizá-lo para descrever o atrito nos processos de conformação dos metais. Atualmente, este é o modelo mais difundido e apresenta resultados satisfatórios.

No intuito de descrever de maneira realística o estado de atrito nas simulações, novos modelos são propostos e incluem fatores não antes considerados. Dentre estes parâmetros podemos citar como exemplos a velocidade de deslizamento, pressão de contato e temperatura. Assim, Behrens[5] recentemente propos um novo modelo de atrito denominado IFUM em consideração ao Instituto de Conformação dos Metais e Equipamentos de Conformação dos Metais (Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen - IFUM) [6]. Este modelo incorpora uma função referente a velocidade de deslizamento entre as superfícies da matriz e geratriz, bem como considera a tensão de atrito como dependente do estado local de tensões e da deformação plástica da geratriz em função da temperatura e taxa de deformação.

Neste trabalho, o modelo de atrito Viscoplastico(IFUM) é comparado aos modelos mais difundidos em simulações do processo de conformação mecânica, ou seja, Tresca e o modelo de Orowan. O objeto de estudo será o forjamento isotérmico de um flange de geometria axissimétrica. Os diferentes modelos serão incorporados no software de simulação em elementos finitos Forge NxT 2.0 e serão comparados os valores experimentas de força de conformação e temperatura com os resultados obtidos por simulação numérica para cada um dos modelos de atrito considerados.

II. MODELOS DE ATRITO

3.1. Modelos de Atrito para processos de Forjamento

A teoria de adesão determina que a tensão de cisalhamento máxima na interface de contato entre o material e a ferramenta é a tensão limite de elasticidade do material em cisalhamento puro. Entretanto, sabe-se que nos processos de conformação mecânica a tensão de contato entre o material e a ferramenta pode superar este valor. Assim, verifica-se pela Figura 1 que uma vez atingida a tensão de escoamento em cisalhamento (κ) do material, um aumento no valor da tensão normal (σ_N) implica na diminuição do atrito (τ_a) [7]. Nesse caso, em que altas tensões de contato estão envolvidas, o atrito deve ser contabilizado pela Equação 1.

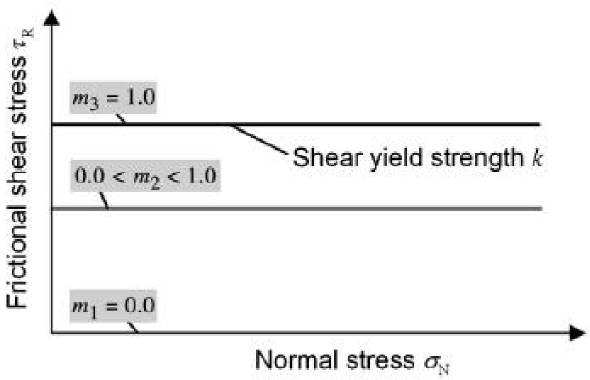


Fig. 1: Modelo de atrito de Tresca.

$$\tau_a = m * k \quad (1)$$

Esta alternativa para contabilizar o atrito determina que a tensão de cisalhamento devida ao atrito é independente da tensão de contato entre as superfícies e é conhecida como lei de Prandtl [8]. Os valores limites para o fator de atrito (m), são: m=0 quando não existe atrito e m=1 para condições de aderência. Sempre que as tensões de contato são muito elevadas, onde o coeficiente de atrito, μ, deixa de ser significativo, a lei de Prandtl deve ser aplicada [8]. No entanto, sua utilização em situações com tensões de contato reduzidas pode levar a estimativas exageradas do valor da tensão de cisalhamento devido ao atrito aplicado em

processos de conformação nos quais a pressão normal de contato atinge um valor muito maior que a tensão de escoamento da peça. Os processos de forjamento e extrusão são exemplos onde são assumidos altos valores de pressão. Por outro lado, a utilização deste modelo esbarra na dificuldade de o atrito não depender do estado de tensões na interface. Nesse caso as tensões de atrito na interface são superestimadas em processos com baixas tensões normais [9].

Desta forma, afim de suprimir as desvantagens de cada um dos modelos previamente propostos, Orowan [4] propôs uma combinação dos modelos de Coulomb e Tresca. A Figura 2 representa graficamente o modelo enquanto que a Equação 2 o descreve em termos de suas variáveis. Usualmente, os valores do coeficiente de atrito (μ) variam entre 0 e 0,5 e o valor do fator de atrito (m) varia entre 0 e 0,577 dependendo do critério de escoamento considerado.

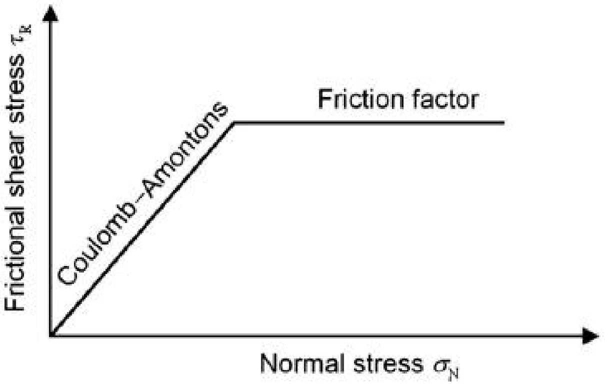


Fig. 2: Modelo de atrito de Orowan.

$\tau_a = \mu * \sigma_N$ se
$(\mu * \sigma_N < m * k)\tau_a = m * k$ se
$(\mu * \sigma_N \geq m * k)$ (2)

Posteriormente, diversos modelos de atrito modificados foram propostos com o intuito de contabilizar as mudanças locais de tensão e propriedades do material durante processos de conformação de metais sólidos. Dentre estes modelos, podemos citar os trabalhos de Doege e Bederna [10], Shaw, Bay and Wanheim [11]e Neumaier [12].

O modelo de atito IFUM, proposto por Behrens 2011, foi desenvolvido para operações de forjamento a quente. A tensão de atrito é dada pela Equação 3.

$$\tau_a = m\left[\left(1 - \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\right) * \sigma_N + k * \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\left(a - exp^{\frac{-|\sigma_N|}{\sigma_y}}\right)\right] * f(v_{rel}) \quad (3)$$

Onde a função peso da velocidade de deslizamento ($f(v_{rel})$) é apresentada conforme Equação 4.

$$f(v_{rel}) = exp^{\frac{-1}{2}\left(\frac{v_{rel}}{C}\right)^2} \quad (4)$$

O principal atributo deste modelo é a capacidade de distinguir entre tensões de contato baixas e altas, ou seja, entre deformação plástica e elástica. Esta distinção ocorre, principalmente, devido a consideração da velocidade de deslizamento e tensões instantâneas locais para o cálculo da tensões tangencial de atrito. Resultados experimentais indicaram altas velocidades de deslizamento resultam numa menor influência na tensão de atrito. Desta forma, o parâmetro C é utilizado para ajustar a influência da velocidade de deslizamento sobre a tensão de atrito. Considerando este fator, espera-se um modelamento mais realístico do processo a ser estudado [13]. A Figura 3 representa a curva a qual relaciona os valores de velocidade de deslizamento para a função peso considerando diferente valores de C (1<=C>=150). Assim, com o aumento dos valores de C, a influência da velocidade de deslizamento na tensão de atrito decresce [13].

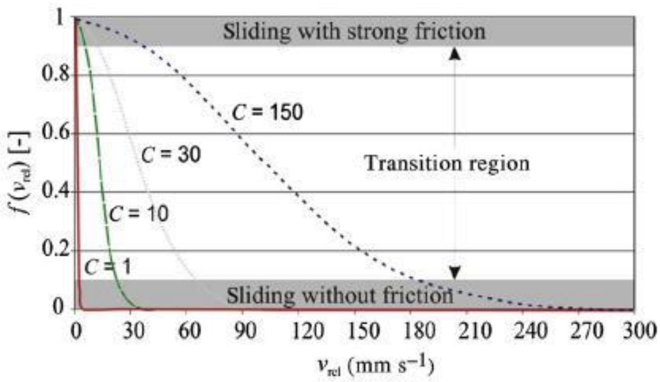


Fig. 3: Influencia do parâmetro C sobre a função peso da velocidade de deslizamento

III. MATERIAIS E METODOS

3.1. Ensaios de compressão do anel

Ensaios de compressão do anel foram conduzidos da liga de alumínio ISO EN 6082. A liga 6082 apresenta bom desempenho para processos de conformação a quente, com uma gama de aplicações principalmente na fabricação de componentes automotivos. Sua composição química foi obtida através de espectrometria de massa e é apresentada na Tabela 1.

Tabela: 1

Al	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Cu	Outros
97,29	1,142	0,256	0,488	0,723	0,011	0,005	0,039	0,013	0,0331

As dimensões dos corpos de prova seguem a geometria canônica, 6:3:2, proposta para o ensaio de compressão do anel e podem ser visualizadas na Figura 1.

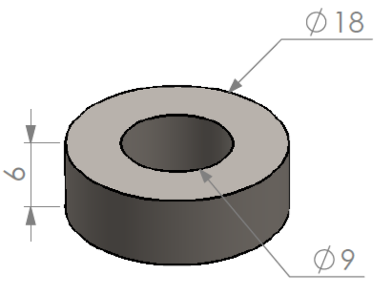


Fig. 4: Dimensões em milimetros dos corpos de prova para o ensaio de compressão do anel.

Para os ensaios, uma máquina de Ensaio Universal com capacidade de 600 kN foi utilizada. Os testes foram realizados a velocidade constante de 5 mm/s. Bases planas com diâmetro de 155 mm fabricadas em Aço de Trabalho a Quente AISI-H13 com dureza próxima a 55 HRC foram utilizadas como matrizes para os experimentos. O procedimento de lubrificação incluía uma cuidadosa limpeza das matrizes, pulverização do lubrificante, uma mistura de grafite e água, sobre as faces planas da matriz previamente aquecidas a 350°C. Posteriormente, os corpos de prova aquecidos a 350°C eram posicionados sobre as matrizes e imediatamente realizado sua compressão. Com o intuito de realizar experimentos similares as condições de forjamento isotérmico, um dispositivo de isolamento foi utilizado reduzir a perda térmica durante a o posicionamento e a compressão, Figura 5.

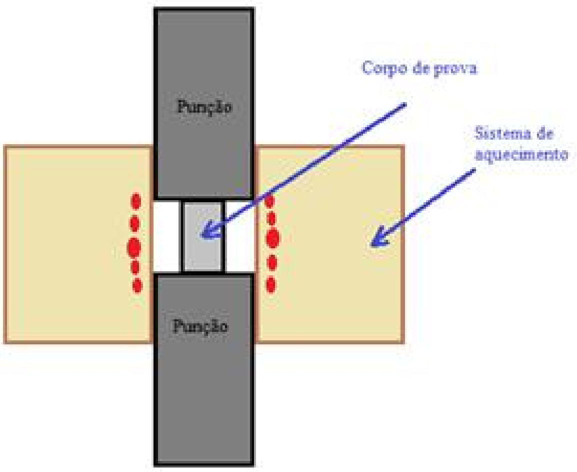


Fig. 5: Ilustração do dispositivo de isolamento termico.

As reduções empregadas foram de 30% e 60% da altura inicial do corpo de prova. Para cada redução, 3 corpos de prova foram ensaiados com o intuito de prover maior confiabilidade para os dados experimentais. Antes e após dos experimentos, as dimensões dos corpos de prova eram medidas com o auxílio de um micrômetro centésimal. Para garantir uma maior precisão, uma média de três medidas em regiões diferentes eram realizadas.

3.2. Forjamento isotérmico

Com o intuito de realizar um comparativo entre simulação numérica e processo real, experimentos de forjamento isotérmico foram executados. Para isso, a geometria de estudo é apresentada na Figura 6a. Escolheu-se um flange axissimétrico devido a sua grande difusão em aplicações industrias e facilidade de análise via elementos finitos. A geratriz utilizada para os experimentos de forjamento é apresentada na Figura 6b.

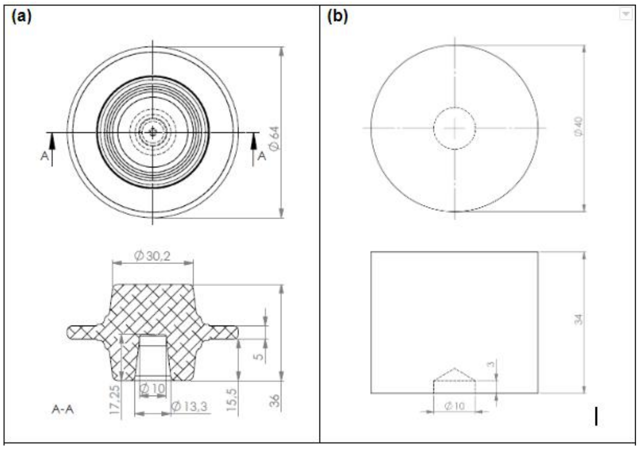


Fig. 6: Geometrias de estudo, dimensões em mm, (a) forma final do flange axissimétrico; (b) geratriz cilíndrica

O material utilizado para os experimentos de forjamento serão os mesmos utilizados nos experimentos de ensaio de compressão do anel em temperatura. Sendo ambos a liga de alumínio ISO EN 6082 conforme previamente apresentado na Tabela 1.

As matrizes de forjamento compostas de aço AISI H13 com dureza de aproximadamente 55HRC. Figura 7 mostra uma vista em corte da matriz superior e inferior, bem como, o canal para saída de gás, a cavidade dos pinos guias, o canal de rebarba e uma representação da peça idealizada. Para os experimentos de forjamento, a matriz de forjamento foi pré-aquecida a 350°C através de cartuchos de aquecimento presentes na matriz.

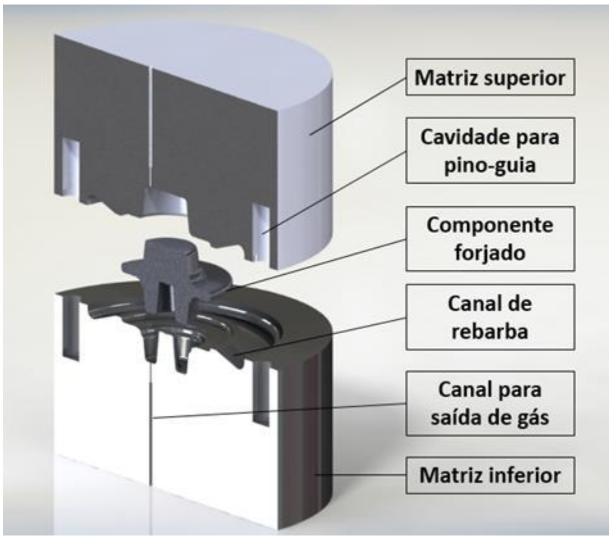


Fig. 7: Representação geometrias do processo de forjamento.

As geratrizes foram mantidas em um recipiente contendo grafite em pó e aquecidas a uma temperatura de 350°C por trinta minutos em um forno de resistência elétrica. Para os experimentos de forjamento da peça utilizou-se a prensa hidráulica da marca FKL, a qual possui capacidade de força de 6000 kN e velocidade de avanço de 5 mm/s.

Durante o experimento de forjamento isotérmico, a força aplicada durante o processo foi aquisitada para posterior comparação com os modelos numéricos. Para isto, utilizou-se uma célula de carga, sendo o sinal adquirido pelo aparelho Spider 8, da empresa HBM e tratado pelo software Catman Express. O deslocamento da prensa foi monitorado por um extensômetro de contato, tipo LVDT, o qual também foi acoplado ao Spider 8 e tratado pelo mesmo software.

2.3. Simulação numérica em elementos finitos

Para a simulações numéricas do processo de forjamento isotérmico, o software Forge NxT 2.0 foi utilizado e foram consideradas condições de contorno mais próximas dos experimentos, Tabela 2. A simulação numérica foi dividida em duas partes: a primeira considera a perda de calor devido a retirada da geratriz do forno até o posicionamento nas matrizes; a segunda simulação considera a deformação da geratriz. Com o intuito de diminuir o esforço computacional o modelo adotado foi 3D-elastoplástico onde as matrizes foram consideradas corpos rígidos. As dimensões do corpo de prova seguem as apresentadas na Figura 6. Ademais, devido a simetria axissimétrica, somente uma seção de 30° do processo real foram simulados. A Figura 8 mostra o modelo criado

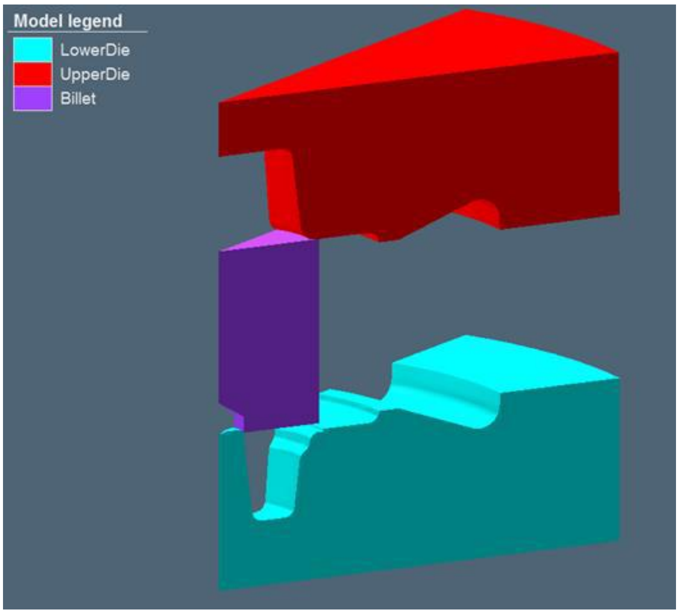


Fig.8: Geometria seccionada utilizada nos modelo numerico.

A Equação 5 e 6 representa a curva de escoamento segundo a proposição de Hensel-Spittel para a liga de alumínio ISO EN 6082. As unidades tanto dos valores de kf0, como de kf, são MPa. Ademais, a Tabela 2 descreve os outros parâmetros de entrada para o modelo.

$$k_{f0} = 64{,}46 \quad (5)$$

$$k_f = 250{,}98 \cdot e^{-0{,}00321 \cdot T} \cdot \varphi^{0{,}10584} \cdot e^{\frac{-0{,}00006}{\varphi}} \cdot (1 + \varphi)^{-0{,}00168 \cdot T} \cdot e^{0{,}11905 \cdot \varphi} \cdot \dot{\varphi}^{0{,}00024} \quad (6)$$

Tabela 2: Dados utilizados nos modelos numéricos.

Tamanho da malha	1 mm
Tipo de elemento	Tetraédrico – isoparamétrico – 4+1 nós
Número de elementos	46665 elementos
Temperatura inicial da geratriz	350°C
Temperatura inicial das matrizes	350°C
Temperatura ambiente	30°C
Coeficiente de troca de calor por convecção	50 W/m²^2.K
Coeficiente de troca de calor por condução	20000 W/m^2.K
Emissividade	0.88
Atrito	μ, m=determinados. C= 1 e 150.
Tipo de prensa	Hidráulica

Velocidade da prensa	5 mm/s

IV. RESULTADOS

3.1. Ensaios de compress o do anel

Com os experimentos de compressão do anel realizados podemos então determinar suas deformações e relações, Figura 9.

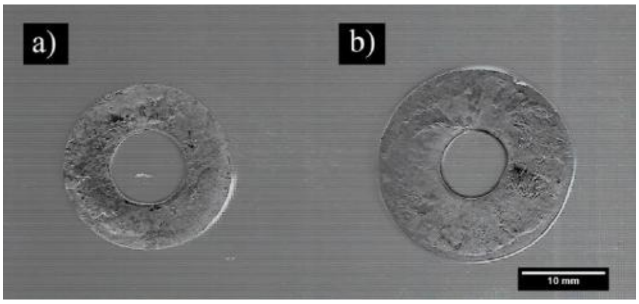


Fig. 9: Anéis deformados a 350ºC a) deformação de 30% em altura e,b) deformação de 60% em altura.

Os valores obtidos pelo ensaio de compressão do anel podem serem observados na Tabela 3. Estes foram utilizados para a determinação dos coeficientes de atrito para os modelos de atrito de Tresca e de atrito combinado Figuras 10 e 11.

Tabela 3. Relações geométricas obtidas pelo ensaio de compressão do anel.

	Cp inicial	Cp1_30	Cp2_60
h	6,00	4,45	2,85
Area int	63,25	60,26	52,16
Area ext	252,50	324,19	426,71
Dint	8,97	8,76	8,15
Dext	17,93	20,32	23,31
Relações de redução			
(hi-h0)/hi		25,83	52,50
(di-d0)/di		2,67	9,46
(Di-D0)/Di		-12,87	-29,49

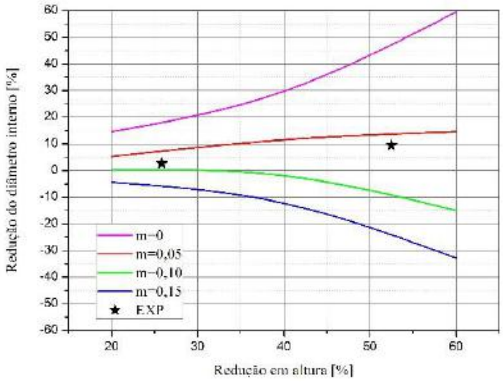


Fig. 10: Curvas de calibração de atrito para o modelo de Tresca.

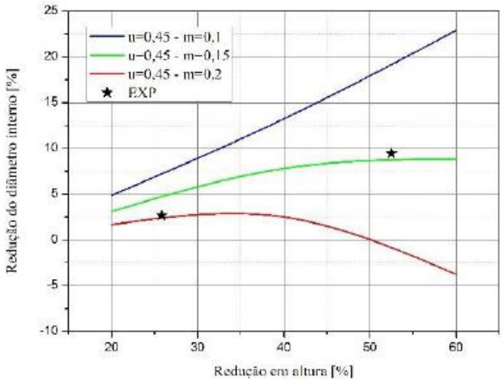


Fig. 11: Curvas de calibração de atrito para o modelo de atrito combinado.

Com os experimentos de compressão do anel foi possível determinar os valores dos parâmetros para os diferentes modelos de atrito, na Tabela 4, é possível observar os valores obtidos.

Tabela.4: Valores dos parâmetros de atrito determinados.

Modelo de atrito	Parâmetro	Valores
Tresca (simples)	ṁ - Fator de atrito	ṁ = 0,057
Orowan (combinado)	µ - Coeficiente e ṁ - Fator de atrito	µ = 0,451; ṁ = 0,19
IFUM (viscoplastico)	Alpha e P	Alpha = 0,157; P = 0,15

Com os valores dos parâmetros conhecidos foi possível então através de modelagem por elementos finitos ser realizado experimentos de forjamento utilizando os parâmetros conhecidos onde os valores de força final de forjamento foi comparado ao valor final no experimento

físico de forjamento. Os valores de força de forjamento obtidos tanto pelo experimento físico quanto para os diferentes modelos de atrito podem ser observados nas Figuras 12 e 13.

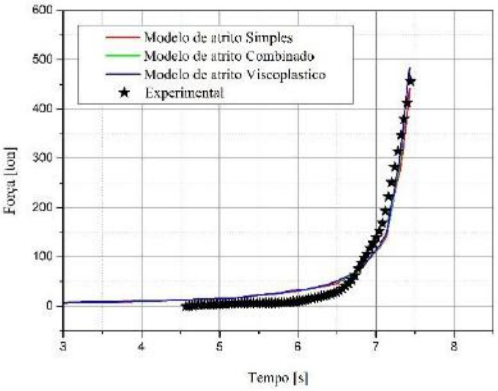


Fig. 12: Valores de força pelo Tempo obtidos para os experimentos, físico e numéricos.

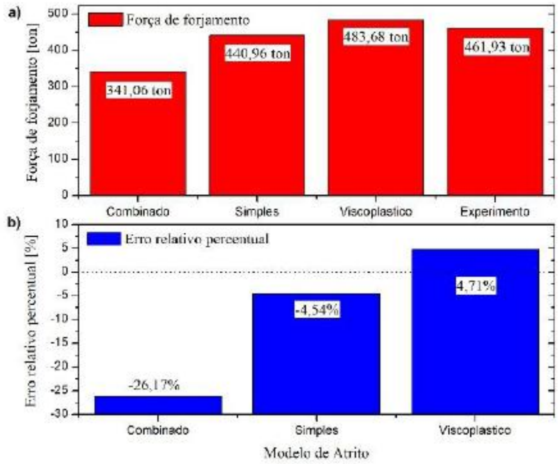


Fig. 13: Análise dos valores de; a) força de forjamento final e b) do erro relativo percentual entre os modelos de atrito estudados.

V. CONCLUSÕES

Através dos ensaios de compressão do anel a quente foi possível determinar os parâmetros dos diferentes modelos de atrito a quente para o forjamento do flange.

Nos experimentos de forjamento foi observado que nos modelos de atrito simples e viscoplastico obtiveram resultados mais próximos quando comparado com o valor de força de forjamento no experimento físico.

O modelo de atrito simples apresentou o pior desempenho ao subestimar o valor da força de forjamento em mais de 80ton.

Dentre os três modelos de atrito o modelo de atrito simples e o modelo de atrito visco plástico foram os que obtiveram menores diferenças entre o valor da força de forjamento.

Devido ao modelos de atrito simples e viscoplástico apresentarem boa similaridade ficando ambos com uma diferença menor que 5% da força de forjamento experimental, não há uma definição clara entre o mais indicado. Porém cave ressaltar que o modelo de atrito viscoplástico leva maior vantagem em relação ao modelo de atrito simples devido às suas limitações.

ACKNOWLEDGEMENTS

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Processo n°142162/2019-1.

REFERENCES

[1] Santos, L. H.; Schaeffer, L.; Cézar, J. L. Fabricação de pás de turbinas Pelton por processo de forjamento a frio. Anais da 20ª Conferencia Internacional de Forjamento - Brasil. Porto Alegre: 2016.

[2] Alba, D.R., Santos, T.G. and Schaeffer, L. 2018. Otimização em elementos finitos para definição do fator de atrito através de ensaios de compressão de anéis. 22nd International Forging Conference – Brazil. 38 SENAFOR.

[3] .Schey, J. Metal Deformation Processes: Friction and Lubrication; Dekker/Pergamon: New York, 1979.

[4] Orowan, E., 1943, “The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling,” Proc. Inst. Mech. Eng., 150(1), pp. 140–167.10.1243/PIME_PROC_1943_150_025_02

[5] Behrens, B.- A.; Bouguecha, A.; Hadifi, T.; Mielke, J.; Kazhai, M.: Personal communication, November 2012

[6] Behrens, Bernd-Arno & Bouguecha, Anas & Lüken, I. & Mielke, J. & Bistron, M.. (2014). Tribology in Hot Forging. Comprehensive Materials Processing. 5. 211-234. 10.1016/B978-0-08-096532-1.00538-0.

[7] Altan, T.; Vazquez, V. Numerical Process Simulation for Tool and Process Design in Bulk Metal Forming. Ann. CIRP 1996, 45 (2), 599–615.

[8] Brito, A.M.G., Análise Teórico-Experimental dos Processos de Expansão, Redução e Inversão de Extremidades de Tubos de Parede Fina em Matriz. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.

[9] Alves, M.L. Modelação Numérica e Análise Experimental de Operações de Forjamento. IST/UTL, 2004. Tese (Doutorado)

– Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal
[10] Doege E, Bederna C (1996) Analysis of boundary stresses and temperatures in hot massive forming. Prod Eng 3(2)
[11] Bay, N., and Wanheim, T., 1976, “Real Area of Contact and Friction Stress at High Pressure Sliding Contact,” Wear, 38an(2), pp. 201–20910.1016/0043-1648(76)90069-7.
[12] Neumaier, T. Zur Optimierung der Verfahrensauswahl von Kalt-, Halbwarm- und Warmmassivumformverfahren. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Hannover, 2003
[13] Behrens, Bernd-Arno & Bouguecha, Anas & Hadifi, Tarik & Mielke, Jens. (2011). Advanced friction modeling for bulk metal forming processes. Production Engineering. 5. 10.1007/s11740-011-0344-8.